

УДК 669.2

**М. С. Пархоменко\*, А. И. Базлов, О. И. Мамзурина**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва

\*markrenton94@gmail.com

Научный руководитель — канд. техн. наук А. И. Базлов

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ МАРГАНЦА НА ТЕРМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ $(\text{Zr}_{0,5}\text{Cu}_{0,5})_{90-x}\text{Al}_{10}\text{Mn}_x$

В работе исследовались металлические стекла состава  $(\text{Zr}_{0,5}\text{Cu}_{0,5})_{90-x}\text{Al}_{10}\text{Mn}_x$ , где  $x = 0,5; 1; 2$ , полученные методом сверхбыстрой закалки на вращающийся медный диск. Определено влияние добавки марганца на электрические и термические свойства исследуемых сплавов. Показано существенное влияние добавки марганца на коэффициент тензочувствительности сплава. Проанализировано влияние релаксационного отжига на термическую стабильность свойств исследуемых сплавов.

*Ключевые слова:* цирконий, марганец, аморфные металлы, тензочувствительность

**M. S. Parkhomenko, A. I. Bazlov, O. I. Mamzurina**

## INFLUENCE OF MANGANESE ADDITION ON THERMAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS ALLOYS $(\text{Zr}_{0,5}\text{Cu}_{0,5})_{90-x}\text{Al}_{10}\text{Mn}_x$

In this paper, we studied the metal glass composition  $(\text{Zr}_{0,5}\text{Cu}_{0,5})_{90-x}\text{Al}_{10}\text{Mn}_x$ , where  $x = 0,5; 1; 2$ , obtained by ultrafast hardening on a rotating copper disk. The influence of manganese additive on the electrical and thermal properties of the studied alloys was determined. The significant influence of manganese addition on the alloy strain sensitivity coefficient is shown. The influence of relaxation annealing on the thermal stability of the properties of the studied alloys is analyzed.

*Key words:* zirconium, manganese, bulk metal glasses, strain sensitivity

**Р**азвитие современной техники вызывает потребность в поисках и разработке новых материалов, обладающих не только более вы-

сокими эксплуатационными свойствами, чем существующие, но и такими сочетаниями различных по своей природе свойств (физических, механических и химических), которые не могут быть достигнуты на базе кристаллических материалов. Таким новым классом материалов являются аморфные металлические сплавы.

В частности, циркониевые металлические стекла сочетают в себе высокие предел прочности, величину упругой деформации [1–3] и коррозионные свойства, низкий модуль Юнга, также данные сплавы являются термически стабильными в широком интервале температур [4–6].

Совокупность этих свойств позволяет сделать предположение, что эти аморфные сплавы возможно использовать в качестве чувствительного элемента в прецизионных тензодатчиках, работающих, например, при повышенной температуре или в агрессивных средах.

Так как основная система легирования циркониевых аморфных стекол  $Zr-Cu-Al$ , базовым сплавом для исследований был выбран  $Zr_{45}Cu_{45}Al_{10}$ , а также три сплава  $(Zr_{0,5}Cu_{0,5})_{90-x}Al_{10}Mn_x$ , где  $x = 0,5; 1$  и  $2\%$  Mn. Марганец был выбран потому, что это 3D-элемент с крайне высоким и термически стабильным электросопротивлением, который, по нашему мнению, должен повысить и стабилизировать термоэлектрические свойства исследуемого аморфного сплава.

Сплавы выплавлялись из следующих шихтовых материалов: цирконий йодидный, чистота 99,9 % (ТУ 95 46–97), Медь МО, чистота 99,95 % (ГОСТ 859–41), Алюминий А99 (ГОСТ 11069–2001), чистота 99,99 % (ГОСТ 11069–2001), лигатура Cu-20 % вес. Mn, вакуумно-индукционной плавки.

Плавка проходила в вакуумной аргоно-дуговой печи в атмосфере аргона чистотой 99,9995 % после предварительного вакуумирования до давления  $10^{-3}$  Па. Полученные слитки подвергались разливке в вакуумной машине спиннингования расплава, скорость вращения диска составляла 35 м/с. Полученные образцы в виде ленты шириной ~1 мм и толщиной 30 мкм подвергались отжигу при температуре 400 °С с временем выдержки 5, 10 и 20 мин с целью стабилизации структур.

Рентгенографические исследования образцов до и после термической обработки показали полностью аморфную структуру благодаря наличию широких диффузионных пиков на рентгенограммах. Добавка марганца к сплаву незначительно снижает его термическую стабильность за счет уменьшения интервала переохлажденной жидкости (с 57 °С в базовом сплаве до 44 в сплаве, содержащем 2 ат. % марган-

ца). Добавка марганца 0,5 % повышает удельное электросопротивление аморфного сплава с 2,25 мОм·мм до 2,57 мОм·мм, что связано с рассеиванием движущихся электронов свободными электронами и кластерами атомов, так как добавление марганца, 3D-элемента с высокой эффективной массой  $d$ -электронов и семью электронами на внешней  $d$ -оболочке сильно увеличивает количество электронов в эл. газе. В литом состоянии зависимость электросопротивления сплава имеет два линейных участка (20–150 °С и 150–280 °С). Было установлено, что изотермический отжиг при температуре 400 °С благодаря прохождению структурной релаксации стабилизирует ТКС в широком интервале температур (20–350 °С). Показано, что для исследуемых сплавов при деформации в упругой области электросопротивление меняется линейно, а добавка марганца 2 ат. % повышает коэффициент тензочувствительности сплава с 2,7 до 5,1. Данный факт объясняется тем, что добавка марганца меняет электронную структуру сплава, снижает мобильность носителей заряда, что в совокупности с увеличением средней длины свободного пробега электрона в направлении, по которому приложено растягивающее напряжение, приводит к резкому росту коэффициента тензочувствительности.

### Литература

1. Phase separation process preventing thermal embrittlement of a Zr–Cu–Fe–Al bulk metallic glass / D. V. Louzguine-Luzgin [et al.] // *Scr. Mater.* 167. 2019. P. 31–36.
2. Influence of Ag and Co additions on glass-forming ability, thermal and mechanical properties of Cu–Zr–Al bulk metallic glasses / B. Escher [et al.] // *Mater. Sci. Eng. A.* 673. 2016. P. 90–98.
3. Co substituted Zr–Cu–Al–Ni metallic glasses with enhanced glass-forming ability and high plasticity / Y. Zhang, M. Zhou, X. Zhao, L. Ma // *Non. Cryst. Solids.* 473. 2017. P. 120–124.
4. Thermodynamic assessment of the phase equilibria and prediction of glass-forming ability of the Al–Cu–Zr system / C. Zhou, C. Guo, C. Li, Z. Du // *J. Non. Cryst. Solids.* 461. 2017. P. 47–60.
5. Thermodynamic analysis of the Al–Cu–Zr bulk metallic glass system / H. Bo [et al.] // *Intermetallics.* 18. 2010. P. 2322–2327.
6. Atomistic approach to predict the glass-forming ability in Zr–Cu–Al ternary metallic glasses / C. Y. Yu [et al.] // *J. Alloys Compd.* 627. 2015. P. 48–53.